

АННОТАЦИЯ ПО ПРОЕКТУ

Государственный контракт № 14.740.11.0387 от 20 сентября 2010 г.

Тема: «Изучение физико-химического поведения радиоактивных элементов в солевых расплавах, являющихся перспективными рабочими средами для организации короткозамкнутого ядерного топливного цикла»

Исполнитель: Федеральное автономное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Ключевые слова: радиоактивные элементы, продукты деления, облучённое ядерное топливо, ядерный топливный цикл, спектроскопия, электрохимия, ионно-координационное состояние, солевые расплавы, ионные жидкости

1. Цель проекта

Важнейшей составляющей короткозамкнутого ядерного топливного цикла является переработка маловыдержанного облучённого ядерного топлива с высокой степенью выгорания делящихся материалов, которая может быть реализована лишь с использованием неводных методов переработки ОЯТ в радиационно-устойчивых рабочих средах, в частности, солевых расплавах. Практическая реализация пирохимических технологий в ядерном топливном цикле невозможна без детального исследования свойств и поведения основных компонентов ядерного топлива в рабочих средах. Поэтому основной задачей проекта являлось исследование свойств и поведения элементов, присутствующих в ОЯТ, в ионных средах и получение сведений, необходимых для разработки физико-химических основ пироэлектрохимических процессов селекции компонентов ОЯТ.

Цель проекта заключалась в реализации комплексного подхода к изучению физико-химических и электрохимических свойств, ионно-координационного состояния, поведения радиоактивных элементов и продуктов деления в солевых расплавах с привлечением независимых методов исследования; разработке и апробации экспериментальных методик; исследовании электродных процессов, протекающих в расплавленных солях, содержащих ионы радиоактивных металлов, различными методами; изучении процессов взаимодействия солевых расплавов, содержащих ионы переходных металлов, с конструкционными материалами. Полученные результаты позволяют приблизиться к практической реализации пироэлектрохимических технологий в ядерном топливном цикле.

2. Основные результаты проекта

В ходе выполнения проекта был выполнен анализ существующих методологических подходов и экспериментальных методов исследования свойств высокотемпературных ионных расплавов, по результатам которого была выбрана методология комплексного исследования физико-химического поведения радиоактивных элементов и типичных продуктов деления в солевых расплавах, являющихся перспективными рабочими средами для организации короткозамкнутого ядерного топливного цикла. Разработанные методики получили практическую реализацию. Впервые был выполнен цикл систематических исследований по определению физико-химических (плотность, плавкость, электропроводность, вязкость, поверхностное натяжение) и спектроскопических свойств солевых систем на основе хлоридов щелочных металлов и их смесей, содержащих ионы редкоземельных и радиоактивных элементов. Экспериментальные данные были использованы для получения комплексной информации об ионно-координационном состоянии и поведении редкоземельных и радиоактивных элементов в солевых электролитах в интервале температур от 880 до 1300 К. На основании анализа характера изменения свойств от состава расплава сделаны выводы о

координационных свойствах и составе комплексных ионов исследуемых металлов в хлоридных расплавах. По результатам спектроскопических измерений показано, что температура, катионный состав электролита и способ введения хромофора не оказывают влияния на октаэдрическую координацию исследованных элементов. Исследованы электрохимические свойства ряда радиоактивных элементов и их химических аналогов в высоко- и низкотемпературных ионных средах. С привлечением результатов структурных исследований данных систем показана взаимосвязь между структурными свойствами ионных жидкостей и электрохимическим поведением ионов урана при различных температурах. Для получения комплексной информации об электрохимическом поведении радиоактивных и редкоземельных элементов и типичных продуктов деления в ионных средах использована комбинация стационарных и нестационарных методов исследования. Использование в качестве рабочих электролитов как солевых расплавов, так и низкотемпературных ионных жидкостей позволило расширить температурный интервал измерений до 298-1173 К и рассмотреть системы с различными физико-химическими свойствами и типами координации исследуемых элементов. Особенностью проведённых экспериментальных исследований явилась реализация междисциплинарного подхода к изучению электрохимических процессов в расплавленных солях с применением в качестве дополнительных методов определения ионных форм, образующихся в ходе электродных реакций, способов электронной и рентгеновской спектроскопии поглощения. На основании сопоставления результатов электрохимических и спектроскопических измерений впервые было охарактеризовано ионно-координационное состояние технеция, урана и нептуния при различных значениях окислительно-восстановительного потенциала, а также изучено влияние парциального давления кислорода на структуру комплексов кюрия. В ходе выполнения проекта были разработаны методики исследования коррозионной устойчивости металлических материалов в высокотемпературных галогенидных расплавах, которые были использованы для изучения процессов коррозии, как индивидуальных металлов, так и ряда сталей и сплавов, в том числе и в расплавах содержащих элементы, имитирующие основные компоненты облучённого ядерного топлива. Полученные данные позволили определить диапазон потенциально приемлемых конструкционных материалов для использования при высоких температурах в контакте с хлоридными электролитами и выработать рекомендации по возможным способам снижения скорости коррозии конструкционных материалов. В ходе реализации проекта был выполнен цикл экспериментальных работ по исследованию распределения компонентов облучённого ядерного топлива в системе «жидкий металл – солевой расплав» и разработаны способы количественного разделения урана и редкоземельных продуктов деления, основанные на обменных окислительно-восстановительных реакциях. На основании полученных экспериментальных данных были разработаны принципиальные схемы переработки облучённого ядерного топлива в расплавах хлоридов щелочных металлов, включающие поэтапное выделение различных групп продуктов деления и целевых компонентов.

3. Назначение и область применения результатов проекта

Разработанные в ходе выполнения проекта концепции, конструктивные решения и методики, а также полученные экспериментальные данные и результаты могут быть использованы для практической реализации приоритетных направлений развития техники и технологий в Российской Федерации, в частности для создания технологии пирохимической переработки облученного ядерного топлива; при разработке конструкции жидкосолевого ядерного реактора; при разработке технологий получения металлических и керамических материалов (в том числе и наноразмерных) из солевых расплавов.

В настоящее время в России и в мире отмечается устойчивый рост потребления всех энергоресурсов, особенно электроэнергии. Такое увеличение энергопотребления

обуславливает развитие инновационных областей выработки электрической энергии, в частности атомной энергетики. Перспективы её развития связаны с созданием замкнутого ядерного топливного цикла. В 2010 г. Президент РФ Д.А. Медведев четко поставил задачу «...сформировать новую технологическую базу атомной энергетики на основе замкнутого топливного цикла с реакторными установками на быстрых нейтронах». Ожидается, что вклад атомной отрасли в валовой внутренний продукт России в 2020 году достигнет 0,71 % за счет повышения уровня коммерциализации технологий и увеличения выпуска высокотехнологичной инновационной продукции, в частности за счет реализации инновационных технологий замкнутого ядерно-топливного цикла. Для поддержания преимуществ в сфере научно-технического развития атомной отрасли необходима реализация комплексного и системного подхода к решению данной задачи. Необходимо отметить, что проработка альтернативных реакторных технологий и их топливных циклов позволит избежать очевидных рисков, возникающих при выборе единственной базовой технологии. Одной из перспективных ядерных энерготехнологий нового поколения является использование реакторов на быстрых нейтронах как на твёрдом (в том числе и плотном) топливе, так и с активной зоной в виде расплава. Экономическая эффективность ядерной энергетики существенно возрастёт при реализации замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ). Однако проектирование и создание технологий ЗЯТЦ невозможно без получения полного спектра исходных данных, необходимых для проведения опытно-конструкторских работ, что и являлось основной целью реализованного проекта.

Полученные в ходе выполнения проекта сведения о физико-химических и электрохимических свойствах солевых расплавов, содержащих редкие и радиоактивные элементы, поведении основных компонентов облучённого ядерного топлива в солевых расплавах, коррозионной устойчивости конструкционных материалов будут востребованы, прежде всего, при разработке и оптимизации пирохимических технологий переработки облучённого ядерного топлива. Также они представляют интерес для разработки и практической реализации технологий электролитического получения и рафинирования редких металлов, проведения опытно-конструкторских работ по созданию новых типов энергетических реакторов на быстрых нейтронах с активной зоной в виде расплава, обладающих повышенной безопасностью.

Кроме этого результаты проекта используются в образовательных программах подготовки инженеров, бакалавров и магистров, специалистов высшей квалификации в области химических технологий и материаловедения.

Необходимо отметить, что экономическая отдача от подобного рода исследований возможна лишь в долгосрочной перспективе. Совокупность полученных результатов интеллектуальной деятельности может быть использована при разработке и защите прав на создаваемые технологии. Непосредственно в рамках выполнения проекта коммерциализация РИД не предусматривалась.

4. Достижения молодых исследователей – участников Проекта

За время реализации проекта в работе приняло участие более тридцати молодых исследователей, при непосредственном участии многих из которых были получены результаты, соответствующие мировому уровню в области исследования ионных расплавов. Достижения некоторых участников представлены ниже.

В проекте принимали участие молодые исследователи инженер Александров Д.Е. и студент, а впоследствии аспирант, Мальцев Д.С. При их непосредственном участии впервые были получены результаты по механизмам образования соединений урана(V), их поведению и устойчивости в присутствии продуктов деления, соответствующие мировому уровню. Полученные данные могут быть использованы при разработке пироэлектрохимических способов обращения с облучённым ядерным топливом и уже легли в основу двух заявок на патенты на изобретения.

В проекте принимал участие молодой исследователь Абрамов А.В., к.х.н. При его непосредственном участии были разработаны методики спектроскопического исследования коррозионного поведения металлических конструкционных материалов в солевых расплавах и изучена коррозионная стойкость широкого спектра сплавов и сталей. Полученные данные могут быть использованы при разработке технологических процессов, связанных с использованием солевых расплавов для получения и рафинирования редких металлов, переработки облучённого ядерного топлива. В настоящее время выполненные исследования получили дальнейшее развитие с целью подбора конструкционных материалов для практической реализации хлоридной технологии получения циркония.

В проекте принимал участие молодой исследователь, студент, а впоследствии аспирант, Иванов А.Б. При его непосредственном участии впервые было выполнено комплексное исследование процессов образования фосфатов всех редкоземельных элементов в расплаве эвтектической смеси хлоридов натрия и цезия, соответствующее мировому уровню в области разработки методов очистки технологических расплавов от электроотрицательных продуктов деления, определены оптимальные условия проведения процессов. Это позволит использовать полученные результаты при разработке пирохимических технологий переработки облучённого ядерного топлива.

В проекте принимал участие молодой исследователь, аспирант Камалов Р.В. При его непосредственном участии удалось получить данные об условиях образования и устойчивости в хлоридных расплавах всех основных валентных форм молибдена. Полученные результаты соответствуют мировому уровню в области физической химии и электрохимии солевых расплавов, что позволяет их использовать при разработке методов электролитического получения и рафинирования молибдена и продолжить исследования в направлении оптимизации технологий электролитического рафинирования тугоплавких редких металлов в солевых электролитах.

В проекте принимал участие молодой исследователь Данилов Д.А., доцент, к.х.н. При его непосредственном участии была разработана методика спектроэлектрохимического исследования поведения редких и радиоактивных элементов в солевых расплавах, соответствующая мировому уровню высокотемпературной электронной спектроскопии поглощения, позволяющая в режиме реального времени получать информацию об ионно-координационном состоянии исследуемого элемента в зависимости от окислительно-восстановительного потенциала среды. Полученные результаты были использованы при определении условий существования различных валентных форм поливалентных металлов в солевых расплавах и при изучении процессов коррозии металлических материалов.

5. Опыт закрепления молодых исследователей – участников Проекта в области науки, образования и высоких технологий

К выполнению данного проекта было привлечено значительное число молодых исследователей, студентов, аспирантов, инженеров, преподавателей. Всего за пять этапов выполнения проекта в нём участвовали 34 молодых исследователя. Выполнение проекта позволило закрепить наиболее талантливых молодых исследователей в сфере науки, образования и высоких технологий.

Так, инженер А.В. Абрамов в ходе выполнения проекта успешно защитил кандидатскую диссертацию и был впоследствии принят на должность преподавателя-стажёра на кафедру физико-химических методов анализа Уральского федерального университета. После успешного завершения этапа стажировки он с сентября 2013 г. он будет переведён на должность доцента.

Несколько молодых людей, начинавших работу в проекте студентам, после окончания университета поступили в очную аспирантуру и продолжили исследования уже в качестве аспирантов. На момент окончания проекта Д.С. Мальцев и С.Ю. Мельчаков

являются аспирантами второго года обучения, а А.Б. Иванов и В.В. Карпов – первого. Все они являются аспирантами кафедры редких металлов и наноматериалов по специальности 05.17.02 Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов.

Выпускники кафедры, молодые участники проекта, С.М. Якимов и Д.А. Виноградов в настоящее время приняты на работу в ОАО «Уральский электрохимический комбинат» (г. Новоуральск), входящий в дивизион по обогащению урана ядерного энергетического комплекса Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом». Молодые участницы проекта Н.П. Бревнова и А.О. Майшева по окончании университета были приняты на работу на Белоярскую атомную электростанцию (г. Заречный).

Таким образом, участие молодых исследователей в выполнении проекта способствовало их закреплению в области науки, образования и высоких технологий. Этому немало способствовало и то обстоятельство, что молодые люди заинтересовались самостоятельным проведением научно-исследовательской работы и в ходе выполнения проекта успешно участвовали в конкурсах на получение грантов Уральского федерального университета на проведение исследований, стипендий Президента РФ и Правительства РФ для обучающихся по приоритетным направлениям модернизации и технологического развития российской экономики.

6. Перспективы развития исследований

Участие научно-образовательного центра в ФЦП в рамках выполнения данного проекта способствовало формированию плодотворных исследовательских партнёрств. Так, получили дальнейшее развитие и укрепились научные и образовательные связи с Институтом высокотемпературной электрохимии УрО РАН в области исследования физико-химических и электрохимических свойств солевых расплавов. Некоторые студенты участники проекта получили возможность заниматься учебно-исследовательской работой в лабораториях института под руководством ведущих учёных и специалистов. На новый уровень вышли взаимоотношения с Институтом атомных реакторов (ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград). Использование экспериментальной базы института позволило выполнить цикл экспериментов с высокорadioактивными элементами, в частности с кюрием. С другой стороны выполнение проекта позволило создать на базе НИИАР не имеющую аналога в России установку для спектроскопического и спектроскопического исследования солевых расплавов, содержащих ионы трансурановых элементов. Заинтересованность НИИАР в проводимых исследованиях привела к заключению в 2011 и 2012 годах двух договоров на выполнение исследований по разработке способов селекции компонентов облучённого ядерного топлива, на общую сумму 14,49 млн. руб. Продолжение совместных исследований запланировано и на ближайшие годы. Большой интерес к результатам изучения коррозионного поведения и устойчивости конструкционных материалов в солевых электролитах комплексного состава проявило ОАО «Чепецкий механический завод» (г. Глазов) в связи с опытным внедрением хлоридной технологии производства циркония, что также отразилось в заключении договоров на совместные исследования. Таким образом, участие коллектива НОЦ в ФЦП способствовало расширению деятельности центра, налаживанию долгосрочных партнёрских связей, что является гарантией устойчивого развития НОЦ.

Следует отметить, что выполненные исследования и полученные в ходе выполнения проекта результаты представляют большой интерес для ряда стран, занимающихся вопросами разработки перспективных ядерных топливных циклов, в частности Франции, Южной Кореи, Японии, США. Сотрудничество с ядерными центрами в этих странах может способствовать наибольшей отдаче для развития в России инновационных технологий обращения с облучённым ядерным топливом и замыкания

ядерного топливного цикла, а также для выхода российской продукции на глобальные рынки высоких технологий.

Руководитель работ по проекту

Профессор
кафедры редких металлов и наноматериалов

_____ Б.Д. Васин

Руководитель организации-исполнителя:

Ректор УрФУ

_____ В.А. Кокшаров

7 ноября 2012 г.
М.П.